

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-97-100
УДК 629.5.03:621.438

А.З. Багерман

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Россия, Санкт-Петербург

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОВЫХ ТУРБИН И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Объект и цель научной работы. Объектом являются жаропрочные материалы, используемые при изготовлении деталей турбинного тракта газотурбинных двигателей. Цель исследований – получить данные о влиянии условий эксплуатации деталей из этих материалов на их характеристики лучистого теплообмена, не контролируемые при работе двигателя.

Материалы и методы. Материалами являлись образцы жаропрочных сплавов, полученные как с помощью литья, так и по аддитивным технологиям. Использовались результаты испытаний образцов в нагревательной печи в диапазоне температур 20–800 °С.

Основные результаты. Установлена связь изменения степени черноты поверхности различных материалов с их окислением на воздухе при указанных температурах и получена возможность прогнозирования увеличения степени черноты через увеличение объема окисленного слоя.

Закключение. Полученные результаты позволяют оценивать возможное увеличение степени черноты металлических поверхностей при эксплуатации до проведения специальных испытаний.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки турбин, степень черноты поверхности, скорость окисления.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-97-100
UDC 629.5.03:621.438

A. Bagerman

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

EMISSIVITY OF AIR-GAS CHANNEL SURFACES IN GAS TURBINES AND ITS IN-SERVICE CHANGES: PREDICTION FEASIBILITY ASSESSMENT

Object and purpose of research. This paper discusses heat-resistant materials used in air-gas channel components of gas turbines. The purpose of this study was to investigate how radiant heat exchange of these components is affected by the service conditions that cannot be controlled during turbine operation.

Materials and methods. The study was performed on the samples of heat-resistant alloys (both moulded and additive) and based on the test data for their heating up to the temperatures of 20–800 °С.

Для цитирования: Багерман А.З. Оценка возможности прогнозирования степени черноты поверхностей деталей проточной части газовых турбин и ее изменения в процессе эксплуатации. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 2(392): 97–100.

For citations: Bagerman A. Emissivity of air-gas channel surfaces in gas turbines and its in-service changes: prediction feasibility assessment. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 2(392): 97–100 (in Russian).

Main results. The study made it possible to understand how surface emissivity of various materials depends on their oxidation in the air at above-mentioned temperatures, as well as to predict the decrease of emissivity due to the growth of oxidated layer volume.

Conclusion. The results of this study enable the assessment of possible in-service emissivity decrease of metal structures before special testing.

Keywords: gas turbine, buckets, surface emissivity, oxidation rate.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

В процессе эксплуатации газотурбинных двигателей поверхности деталей горячего тракта находятся вне контроля. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможные изменения в характеристиках материалов горячего тракта, чтобы обеспечить

надежную эксплуатацию двигателя в заданный период времени.

Одним из параметров, обеспечивающих теплообмен, например лопаток турбин с газовым потоком, является степень черноты поверхностей дета-

Таблица 1. Состав сплавов, %

Table 1. Composition of alloys, %

Сплав	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Fe	Nb
CoCr**	0,05	28,0	65,92	6,21	0,02	–	–	–	–
ЭП867*	62,1	9,5	5,0	9,7	5,2	–	4,5	4,0	–
ЭП99*	50,55	22,5	6,5	4,2	7,0	1,25	3,0	5,0	–
ЭП742	62,0	14,0	10,0	5,0	0,2	2,6	2,6	1,0	2,6
IN718**	53,1	18,0	0,09	3,15	–	0,75	0,26	19,6	5,05
ЭП602*	72,1	20,5	0,02	2,0	–	0,55	0,55	3,0	1,10
LPW316**	11,0	17,5	–	2,18	–	–	–	69,32	–
РН1**	4,5	14,7	3,5	0,5	–	–	–	76,8	–
ст20	–	–	–	–	–	–	–	100,0	–

Примечание: * – сплавы, для которых значения степени черноты заимствованы из [1]; ** – сплавы получены по аддитивным технологиям (для этих сплавов были оценены степени черноты поверхности цилиндрических образцов).

Таблица 2. Степень черноты поверхности сплавов, ϵ

Table 2. Surface emissivity of alloys, ϵ

Температура, °C	300	400	500	600	700	$\epsilon_{\text{ср}}$	$\epsilon_{\text{отн}}$
CoCr	0,32	0,315	0,32	0,30	0,35	0,32	–
После окисления	–	0,53	0,49	0,47	0,44	0,50	1,55
ЭИ867*	0,20	0,21	0,22	–	–	0,21	–
ЭП99*	0,34	0,37	0,43	0,60	0,70	0,48	–
ЭП742	0,28	0,25	0,37	0,35	0,35	0,32	–
После окисления	0,48	0,48	0,53	0,53	0,53	0,51	1,59
IN718	0,35	0,33	0,35	0,42	0,53	0,39	–
После окисления	0,48	0,50	0,66	0,66	0,61	0,58	1,47
ЭП602*	0,25	0,25	0,255	0,25	0,485	0,30	–
LPW316	0,50	0,50	0,49	0,47	0,37	0,46	–
После окисления	0,72	0,63	0,60	0,57	0,57	0,62	1,33
РН1	0,65	0,50	0,38	0,33	0,35	0,43	–
ст20	0,57	0,40	0,40	0,40	0,30	0,41	–
После окисления	0,60	0,50	0,45	0,48	0,40	0,48	1,85

Примечание: $\epsilon_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение в интервале 300–700 °C; $\epsilon_{\text{отн}}$ – отношение среднего значения ϵ после окисления к исходному значению.

Таблица 3. Оценка изменения объема сплава в результате окисления

Table 3. Assessment of alloy volume change due to oxidation

Сплав	Параметр	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Fe	Nb	Vo	$V_{отн}$
	$v_i, \text{см}^3/\text{г}$	0,120	0,140	0,112	0,097	0,052	0,40	0,37	0,126	0,116	–	–
	Δ	1,68	2,07	1,69	3,27	3,41	1,73	1,28	2,40	2,69	–	–
ЭП742	$g_i, \text{г}$	62,0	14,0	10,0	5,0	0,2	2,6	2,6	1,0	2,6	–	–
	$g_i \cdot v_i, \text{см}^3$	7,44	1,96	1,12	0,48	0,01	1,04	0,96	0,126	0,30	13,44	–
	$g_i \cdot v_i \cdot \Delta, \text{см}^3$	12,5	4,06	1,89	1,58	0,03	1,8	1,24	0,30	0,81	24,21	1,84
LPW316	$g_i, \text{г}$	11,0	175	–	2,18	–	–	–	69,32	–	–	–
	$g_i \cdot v_i, \text{см}^3$	1,32	2,45	–	0,21	–	–	–	8,73	–	12,71	–
	$g_i \cdot v_i \cdot \Delta, \text{см}^3$	2,22	5,07	–	0,69	–	–	–	20,95	–	28,93	2,27

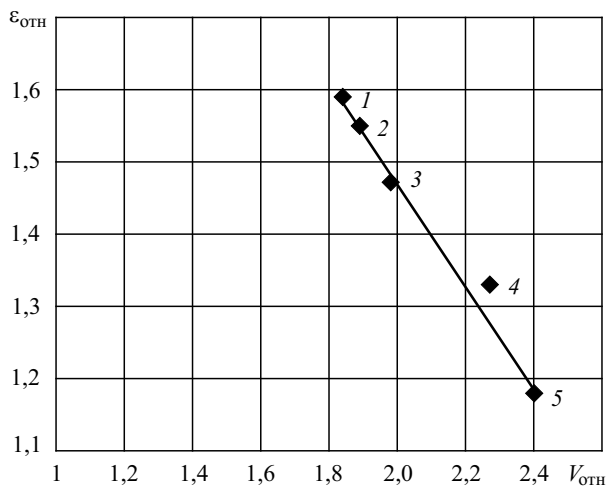
лей из жаропрочных сплавов. Из материалов, описанных в справочных изданиях, удалось использовать три жаропрочных сплава на никелевой основе с указанием степени черноты поверхности, что не позволило составить представление о связи степени черноты с другими характеристиками материалов. Поэтому были проведены специальные опыты (табл. 2: сплавы CoCr, ЭП742, IN718, LPW316, ст20) по определению степени черноты поверхности при температурах поверхности образцов в диапазоне 300–700 °С. В табл. 1, 2 для сравнения приведены характеристики девяти сплавов; данные о трех из них заимствованы из справочника [1].

Как следует из [3], на степень черноты поверхности могут влиять процессы окисления. При окислении металлов их объем изменяется. Например, поверхность материала турбинной лопатки уже после нескольких десятков часов работы представляет собой губчатую структуру, которую хорошо видно только при тысячекратном увеличении. Объем, занимаемый сплавом в поверхностном слое, изменяется. Приведенные в [4] коэффициенты изменения объема показаны в табл. 3.

Для оценки изменения объема сплава (поверхностного слоя, формирующего степень черноты) обращаются к следующему порядку действий (процесс рассматривается применительно к 100 г сплава). Доло каждого металла в сплаве в граммах умножаем на его удельный объем (приведен в табл. 3). Суммируем все произведения и получаем условный объем, занимаемый сплавом до окисления. Условный объем для каждого металла умножаем на коэффициент объема Δ (табл. 3). Суммируем все результаты и получаем новый объем сплава после окисления. Отношение двух объемов – до и после окисления – сравниваем с изме-

нением степени черноты поверхности (см. рисунок). Изменения объемов других рассматриваемых сплавов приведены в табл. 4.

На рисунке показана взаимосвязь изменения объема, занимаемого поверхностным слоем сплава, с изменением степени черноты этой поверхности. Приведенная зависимость показывает наличие взаимосвязи изменения объема поверхностного слоя сплава при окислении $V_{отн}$ с изменением степени черноты его поверхности и, следовательно, возможностью прогнозирования величины одного параметра через другой.



Взаимосвязь относительного увеличения степени черноты поверхности с увеличением объема ее поверхностного слоя: 1 – CoCr; 2 – ЭП742; 3 – IN718; 4 – LPW316; 5 – ст20

Emissivity of material versus volume of its surface layer:
1 – CoCr; 2 – EP742; 3 – IN718;
4 – LPW316; 5 – st20

Таблица 4. Прогноз изменения параметров

Table 4. Prediction of changes in parameters

Сплав	ϵ	$V_{\text{отн}}$	$\epsilon_{\text{отн}}^*$	$\epsilon_{\text{ок}}^*$	$\epsilon_{\text{ок(опыт)}}$
CoCr	0,32	1,90	1,55	0,50	0,50
ЭИ867	0,21	1,85	1,59	0,32	–
ЭП742	0,32	1,84	1,67	0,53	0,51
IN718	0,39	1,98	1,48	0,58	0,58
ЭП602	0,30	1,79	1,63	0,58	–
LPW316	0,46	2,27	1,28	0,59	0,62
PH1	0,43	2,30	1,26	0,54	–
Ст20	0,41	2,40	1,18	0,48	0,48

Примечание: * – прогнозные данные.

Определив расчетом величину относительного изменения объема сплава при окислении по зависимости на рисунке, можно оценить относительное увеличение степени черноты. Зная величину «исходной» степени черноты, можно оценить ее изменение после окисления.

Результаты оценки показали, что прогнозирование изменения степени черноты поверхности с использованием параметра $V_{\text{отн}}$ (относительного объема сплава в результате окисления) возможно.

Выводы

Conclusion

Полученные результаты показали, что у жаропрочных сплавов в диапазоне температур 300–700 °С имеется взаимосвязь между увеличением объема поверхностного слоя сплава в результате окисления в процессе эксплуатации и величиной увеличения степени черноты.

Библиографический список

1. Справочник по авиационным материалам: в 5 т. Т. 3. Коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы / Под ред. *Тумакова А.Т.* Москва: Машиностроение, 1965. 632 с.

2. *Багерман А.З., Леонова И.П., Хорошев В.Г.* Прогнозная оценка статической прочности жаропрочных сплавов при изменении температуры, длительности эксплуатации и окислении // Тяжелое машиностроение. 2019. № 9. С. 36–40.
3. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. Москва-Ленинград: Энергия, 1975. 488 с.
4. Справочник «Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений» в 2 т. Т. 1 / Под ред. *Герасименко А.А.* Москва: Машиностроение, 1987. 688 с.

References

1. Aircraft materials. Reference book. In 5 vol. Vol. 3. Heat- and corrosion-resistant steels and alloys / Under editorship of *A. Tumakov*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1965. 632 p. (in Russian).
2. *A. Bagerman, I. Leonova, V. Khoroshev*. Static strength assessment of heat-resistant alloys due to temperature changes, service duration and oxidation // Tyazheloye Mashinostroyeniye (Heavy Engineering). 2019. No. 9. P. 36–40 (in Russian).
3. *V. Isachenko, V. Osipova, A. Sukomel*. Heat transfer. Moscow: Energiya, 1981. 488 p. (in Russian).
4. Corrosion, ageing and biological damage protection of machines, equipment and structures. In 2 vol. Vol. 1 / Under editorship of *A. Gerasimenko*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. 688 p. (in Russian).

Сведения об авторе

Багерман Анатолий Захарович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 415-47-22. E-mail: bagerman.a.z@mail.ru.

About the author

Anatoly Z. Bagerman, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Researcher Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (812) 415-47-22. E-mail: bagerman.a.z@mail.ru.

Поступила / Received: 10.02.20
Принята в печать / Accepted: 01.06.20
© Багерман А.З., 2020